第28卷 第2期 2016年3月
腐蚀科学与防护技术
CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY
Vol.28 No.2 Mar. 2016

经验交流

高压变电站接地网的远程腐蚀监测技术

王天正[1] 徐 霞[2] 郝晋堂[1] 刘 熙[2] 董泽华[3] 王鹏皓[4]

1. 国网山西省电力公司电力科学研究院 太原 030001;
2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司 武汉 430074;
3. 华中科技大学化学与化工学院 武汉 430074;
4. 国网山西省电力公司太原供电公司 太原 030001

摘要:采用小孔限流与护环电极电流约束设计，并结合电化学阻抗技术，设计了一种能实时监测接地网腐蚀状态的电化学传感器。该传感器通过小孔限流将极化电流约束在小孔于接地网钢板上的投影区，同时通过护环电极电流约束电路，使弥散电流得到补偿，因而较传统方法可以更准确测量接地网的腐蚀速率。系统还通过B/S网络模式和SQL数据库技术，建立了一个集成腐蚀监测、太阳能供电、无线通讯和网络数据库的无线监控系统，实现了基于Internet的现场腐蚀监测数据的网络化访问，使授权用户足不出户即可通过公众网或局域网实时查看现场腐蚀数据或曲线，包括接地网腐蚀速率、腐蚀余量、土壤电阻率与自腐蚀电位等关键参数。通过山西阳泉和太原两个变电站近一年的现场监测表明：该监测系统可以较为准确地测量接地网的腐蚀速率，是接地网可靠运行的重要保障条件之一。

关键词:接地网 腐蚀测量 远程监控 电流约束 电化学阻抗

中图分类号:TG172 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-6495(2016)02-0184-05

1 前言

发变电站接地网是埋入大地中并与大地紧密接触的金属网，为故障电流或雷电流快速泄放提供入地通道、保护人身安全和电气设备安全[1]。当前，出于环境保护和成本考虑，我国普遍采用低碳钢而不是铜网作为接地网材料，接地体在土壤中腐蚀会导致截面积变小、接地电阻增加，造成接地网寿命减短，严重时甚至危及电网的稳定运行。因此，研究接地网在线腐蚀监测方法，实现不断电、不开挖情况下的腐蚀监测，以便及时发现故障，防患于未然，对于保障电力系统的可靠运行具有重要意义。

当前大多数变电站接地网的腐蚀评估通常依靠测量接地网接地电阻值来间接判断[2]，然而，由于电磁干扰和测量精度的限制，直接测量地网接地电阻很难准确评估地网腐蚀状态[3]。也有研究者通过分析接地网埋深位置的土壤，如测量土壤含水率、pH值、含盐量等腐蚀性参数来间接评价地网腐蚀状态[4]，但该方法存在土壤取样工作量大、分析周期长、且不能直接反映地网自身腐蚀速率等不足之处。对接地网进行开挖检查最为直接，然而大面积开挖势必存在盲目性，且还要切断电网停电，存在一定的安全隐患。因此研究一种安全可靠、可操作性强、快速准确的发变电站接地网腐蚀诊断方法十分迫切[5]。

接地网在土壤中的腐蚀属于电化学腐蚀，可以采用多种电化学方法进行腐蚀监测，包括线性极化法[6]、恒电流阶跃法[7,8]和电化学阻抗法[9]等。当前大多数电化学监测方法均需要预埋金属试片于土壤中，只能测量土壤的腐蚀性，并不能直接测量地网自身的腐蚀速率。如果将被测地网作为工作电极，则必须将极化电流限制在一定区域内，否则，被极化接地网面积的不确定性，将会导致腐蚀速率测量产生极大的误差。

为了解决电流约束问题，Feliu等[10]提出采用纯阻容串并联电路来模拟电流分布，但该计算过程复杂且误差极大。Law等[11]提出了护环法(GRM)来约束CE电极的极化电流，但是GRM技术是基于完全约束实现的，导致实际体系中经常出现过约束或欠约束[12,13]现象。针对上述问题，我们在以前的研究工作基础上[14]提出了GE电流约束电路的改进方案，并且研制了集成小孔限流与GE电流约束的接地网腐蚀监测传感器。该传感器通过小孔限流将极化电流约束在接地网钢板上的限定位置，同时通过护环电流约束电路，使弥散电流得到补偿。现场实测表

定稿日期:2015-07-27

作者简介:王天正，男，1965年生，高级工程师

通讯作者:董泽华，E-mail: zhdong@hust.edu.cn，研究方向为腐蚀电化学和工业腐蚀监/检测方法和仪器

DOI: 10.11903/1002.6495.2015.218

明：具有电流约束的小孔限流电极测量结果与参考电极具有较好的一致性。

2 腐蚀监测传感器设计

2.1 电化学阻抗腐蚀监测

电化学阻抗测量是用一个小幅值正弦波电位信号叠加在一个直流极化电位上，通过恒电位电路施加于被测体系，同步测量极化电位以及响应电流，再利用相关积分算法计算出被测电极体系的复数阻抗Z[15]，进而绘制出被测体系的Nyquist图和Bode图。选取适当的等效电路，通过计算机模拟可以获取被测电极体系的界面电容、电荷传递电阻和Randle阻抗等诸多参数。

改变激励正弦波和参考信号的频率，分别测量高、低两个频点ω_H和ω_L的阻抗值Z_H和Z_L，然后根据碳钢在土壤中的腐蚀电化学等效电路[16]，取高频端(100~1000 Hz)的阻抗值为土壤电阻R_s，而将低频端(0.005~0.01Hz)的阻抗值记为R_s与接地网钢板极化电阻(R_p)之和，显然$R_p=|Z_L|-|Z_H|$。最后根据Stern公式$CR=B/R_p$计算腐蚀速率，其中，CR为腐蚀电流密度，单位：mA/cm^2，R_p代表极化电阻，单位：$\Omega\cdot cm^2$，B为Stern系数，一般取值26 mV。

2.2 电流约束传感器

对于接地网腐蚀监测，由于接地网面积巨大，因此极化电流的约束是关键[18,19]，为此我们设计了一款集成小孔限流与护环电极电流约束的接地网腐蚀监测传感器，该传感器采用自适应的电流补偿技术，将来自辅助电极圆环的极化电流限制在接地网钢板上的投影面积内，如图1所示。

图1a显示了单纯小孔限流测量腐蚀速率的原理，由于小孔传感器底部的开口紧紧贴合在接地网钢板上，来自于辅助电极的极化电流无法泄露到孔外，因此所有极化电流均被限制在小孔的投影面积内。然而小孔限流方法有其天然的缺陷，图1b显示了由于小孔传感器与接地钢板之间存在一定的间隙(由于安装不良或土壤沉降造成)，将导致一部分电流从缝隙处泄漏到小孔投影区外，这样就会使实际受到极化的接地网面积大于小孔投影面积，导致测量的腐蚀速率偏大。

实际上单纯依靠小孔限流还存在另一个问题，由于小孔内是一个密封环境，如果小孔紧紧贴合在接地钢板表面，则孔内土壤与外部土壤失去电解质交换，形成了一个孤立的“死区”，这样测得的接地网腐蚀速率只能反映这部分“死区”土壤的腐蚀性，而无法反映外部土壤四季变化过程中对接地网的腐蚀情况。为了避免内部形成“死区”，必须在传感器圆柱侧壁开孔，如图1c侧面的交换孔，这样就可以保证孔内外的电解质(水分)交换。

显然传感器侧面开交换孔后，来自腔内辅助电极CE的电流也会从交换孔中泄露，导致腐蚀速率的测量出现大的偏差。为此，我们设计了基于护环电极(GE)的电流约束环，如图1c中的GE电极环，该GE紧紧套在传感器外侧，用于约束传感器内侧CE环所发出的极化电流。

基于GE的电流约束技术早期主要用于大型混凝土结构中钢筋锈蚀速率的测量[16,17]，对于接地网的腐蚀测量，由于地网钢板面积巨大，来自CE的极化电流在地网表面分布是非常不均匀的。为了防止来自CE的极化电流弥散，用来自GE的电流约束住CE电流，图1c中，由于GE与CE具有相同的电势，使CE电流不能从图1c中传感器侧面的交换孔或者底部的间隙流出，从而使CE电流完全约束在小孔投影面内。

图1c显示了小孔限流与护环电极限流共同控制下的电力线约束情况，此时即使传感器开口有一定程度的密封不良，也可以通过传感器外壁的GE电极来将孔内CE电流约束在孔内。

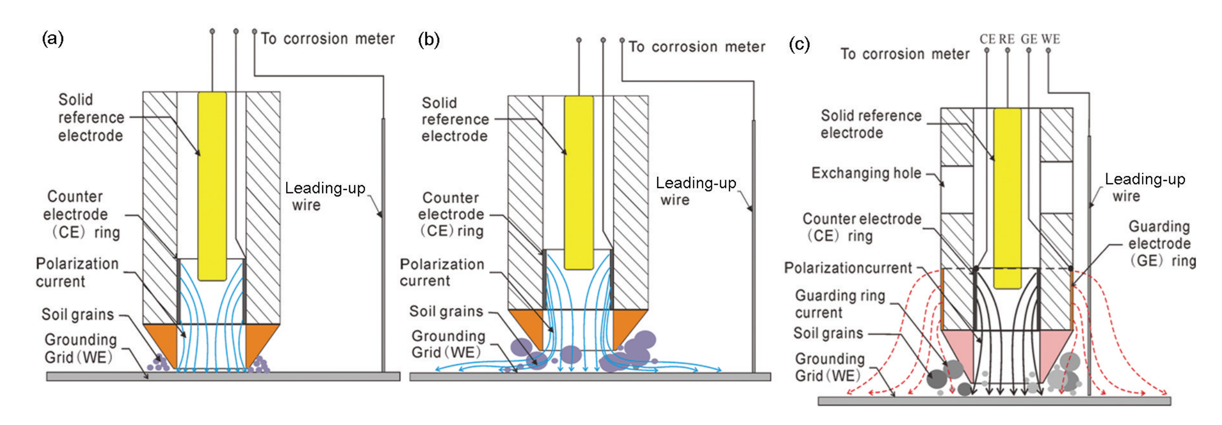


图1 电流约束型地网腐蚀监测传感器: (a) 紧密接触时小孔限流电流分布; (b) 间隙较大时小孔限流电流发散, (c) 间隙较大但外加GE护环时的流线

2.3 电流约束电路

为了将极化电流约束在小孔投影面内，在地网腐蚀速率监测装置中设计有两套恒电位极化电路(如图2)，主回路由U1和U2两个运算放大器组成，U2输出电压加载到辅助电极CE上，使接地网钢板处于极化状态，同时通过差分放大器监测流过取样电阻R_c的极化电流；第二套恒电位极化电路由U2和U3组成，来自U2输出端的电压信号加载到U3反相端，从而使GE输出的电压信号与CE具有完全相同的相位和幅值，即CE与GE形成了一个等电势输出，U3输出的电流则通过GE流向小孔投影面外侧的接地钢板，压制了CE电极的泄漏电流。

3 结果与讨论

3.1 室内实验

为了考察腐蚀监测传感器的电流约束能力，采用尺寸为500 mm×50 mm×2 mm的Q235钢板，并焊接成150 mm等间距的正方形网格，作为模拟接地网。该接地网埋在550 mm×550 mm×200 m的土壤箱中，然后在箱内填入预先配制的中性土壤 (pH值为8.7) 或酸性 (pH值为5.5) 土壤中。将小孔电流约束传感器垂直固定在钢板表面，采用电化学阻抗法测量不同时段内埋地钢板的R_p值，结果见图3。为了对比，同时测量一个面积约1 cm^{2}的Q235电极的R_p值，以作为模拟接地网在同一环境中腐蚀速率的参考值。

从图3来看，在模拟酸性土壤中，当没有开启GE电流约束时，模拟接地网的R_p(1400 Ω·cm^2) 与作为参考值的独立电极的R_p(2300 Ω·cm^2) 之间相差40%，而一旦开启GE电流约束电路后，模拟接地网的极化电阻立刻增至2350 Ω·cm^2，与参考值的误差小于5%。同样的，对于模拟中性土壤也是如此，表明无论是在腐蚀性强或弱的土壤中，经过GE补偿和小孔限流双重约束后，模拟接地网的R_p值均非常接近同材质碳钢电极的R_p值，这也证明GE补偿比普通小孔限流电极能更好地将极化电流约束在小孔投影面积内，保证了测量结果的准确性。

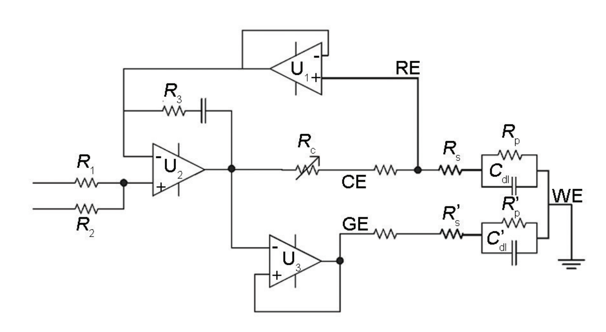


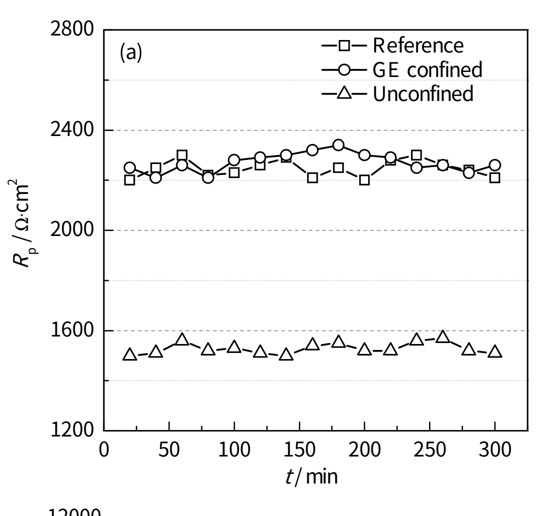
图2 电流约束电路原理图 (U_1为阻抗变换器, U_2为加法器和功率放大器, U_3为单位增益电压跟随器, R_1端输入直流电压, R_2输入正弦波信号, R_c为电流取样电阻, R_s及R_s'分别为传感器小孔内、外的土壤电阻, R_p、R_p'分别为小孔内外接地网的极化电阻, WE为与引上线相连的接地网)

此外，在中性土壤中，由于土壤电阻率较高，IR降较大，因此小孔内的极化电流发散较为困难，所以即使不开启GE电流约束电路，其测量结果与有GE约束的测量结果差别也不大，误差仅为20%，小于酸性土壤下的测量误差 (约为40%)。

3.2 现场实验

远程自动化是当前现场腐蚀监测的一个发展方向，变电站远程无线腐蚀监测系统主要由：接地网腐蚀监测装置，限流型小孔腐蚀监测传感器，GPRS无线收发器和中央监控服务器等4部分组成。中央监控服务器软件能定时联络各个站点分散的无线收发器，并通过后者将现场腐蚀监测传感器的测量数据上传到服务器数据库中，授权用户通过局域网终端可以查看现场腐蚀数据或曲线。

地网腐蚀监测装置采用高速单片机和精密数模转换电路，以电化学阻抗测量为基础，实现了接地网



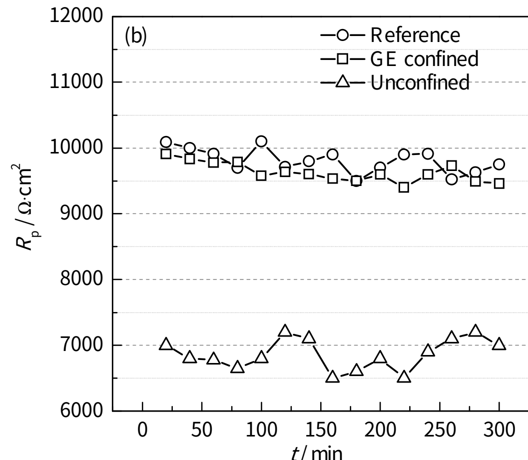
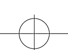


图3 GE电流约束对模拟接地网在不同土壤中的腐蚀测量结果的影响: (a) 酸性土, (b) 中性土



极化电阻和土壤电阻率的同时测量，由于电化学阻抗技术内置相关积分算法，具有较好的抗电磁干扰和交流干扰能力，测量结果离散性小。无线数据通信则以成熟的GPRS网络为基础，实现了低成本下服务器与远程设备之间的双向通信。远程腐蚀监测系统框图如图4。

在山西太原某500 kV和阳泉某220 kV变电站各安装了1套远程接地网腐蚀监测系统，如图5a。该现场腐蚀监测装置采用30 W单晶硅太阳能电池供电，确保不受外部供电中断的影响，且可以避免交流电的引入造成测量干扰。太阳能电池的大容量

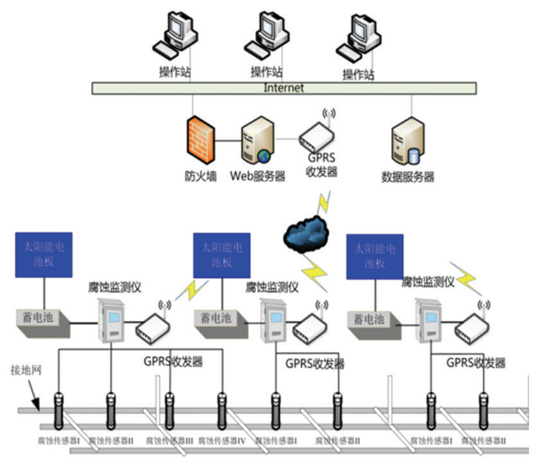


图4 GSM无线腐蚀监测网络组建方案

12 V/40 Ah蓄电池则埋入地下1 m深处，可以防止冬季低温对蓄电池的损害。而腐蚀监测装置、无线收发器和太阳能电池控制器均安装在防水型户外箱中，可增强整套户外监测系统的环境抵抗能力。图5b为基于Internet的网络化腐蚀监测软件界面，主要实现监测站点管理、数据下载、曲线显示、报表统计和报警管理等功能。

图6显示了分别位于阳泉和太原的某两个变电站接地网在土壤中的开路电位 (OCP) 和腐蚀速率变化曲线，其中数据采样间隔为12 h，总时间为8个月，从2014年11月10日至2015年7月9日。接地网的OCP是以固态Ag/AgCl电极作为参比电极，从图6中的OCP曲线来看，在腐蚀监测传感器刚埋入土壤中的数天内，OCP均较正，随后快速负移并接近正常值 (−0.48 V)。图6a显示，随气温或降水的改变，阳泉接地网的OCP一般在−0.50~−0.44 V之间变化；而太原变电站接地网的OCP整体上是在−0.60~−0.53 V之间波动，可见阳泉接地网的OCP整体上较太原的要正80 mV左右，这可能是因为阳泉地区的土壤颗粒孔隙度更大，含氧率更高，因而OCP较正。

从图6a中的腐蚀速率曲线来看，阳泉变电站接地网冬季腐蚀速率较低，约为0.1~0.15 mm/a，而从

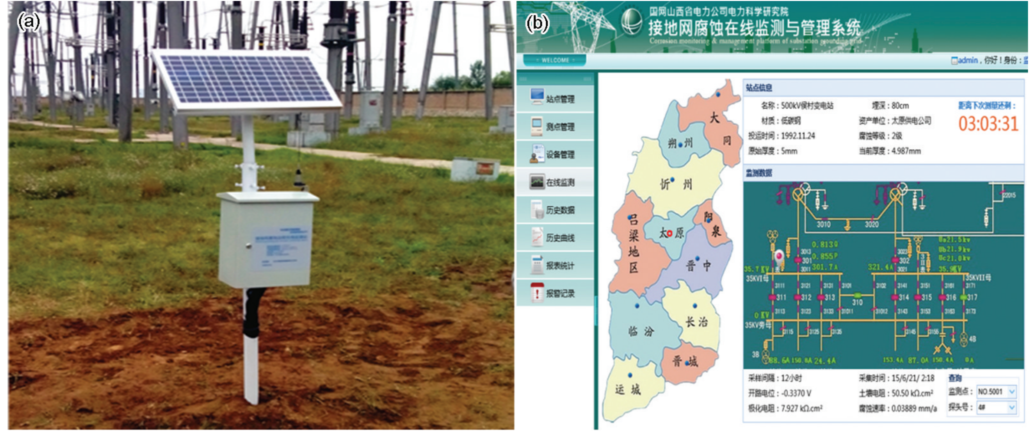


图5 安装于阳泉某变电站的远程接地网腐蚀监测系统 (a) 及接地网腐蚀监测网络化管理平台 (b)

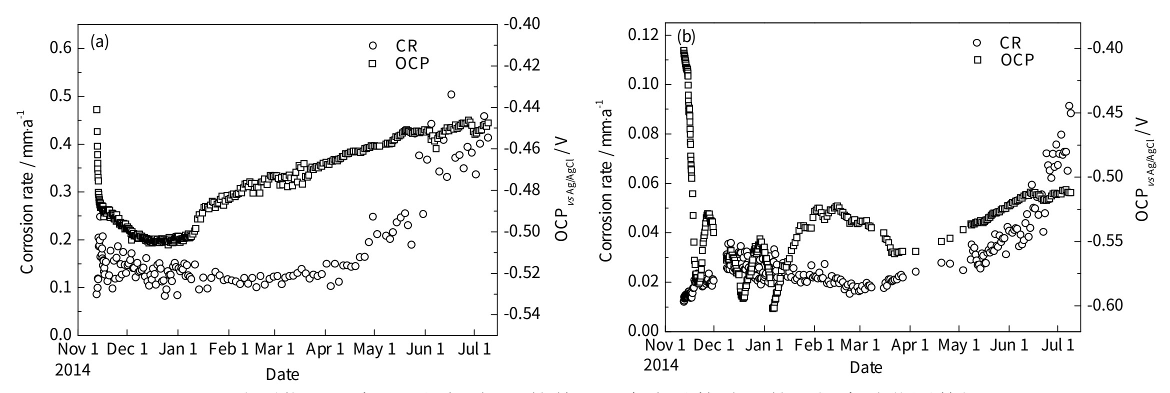
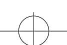


图6 分别位于阳泉 (a) 和太原 (b) 的某两处变电站接地网的现场腐蚀监测数据



2015年4月中旬降雨开始，腐蚀速率快速上升，从0.15 mm/a 增至0.48 mm/a，表明接地网在土壤中的腐蚀速率随降雨的来临 (土壤含水量上升) 而迅速增加，这一腐蚀速率已远远超过电力行业的相关标准 (0.076 mm/a)，半年平均腐蚀速率达到了0.22 mm/a。现场开挖也表明:阳泉接地网锈蚀非常严重。相反在太原某变电站的腐蚀速率曲线中 (如图6b)，腐蚀速率在2015年4月中旬前 (冬季) 均只有0.03 mm/a，只是从5月份后，腐蚀速率才逐步上升至0.1 mm/a，半年的平均腐蚀速率只有0.036 mm/a，仅为阳泉变电站的1/6。现场开挖也表明：虽然经过十年的运行，太原某变电站的接地网腐蚀也非常轻微。阳泉变电站接地网腐蚀速率高于太原接地网，实际上与前者的OCP较正是一致的，碳钢在土壤中的OCP越正，表明土壤含氧量越高，土壤中氧阴极去极化能力越强，腐蚀速率自然也更高一些。

4 结论

(1) 接地网腐蚀速率测量精度取决于传感器极化电流的约束能力，集成小孔限流与护环电极电流约束的腐蚀监测传感器，可以有效地将极化电流约束在接地网于传感器小孔投影区域内，防止电流弥散，提高了腐蚀速率测量精度。

(2) 基于交流阻抗技术和相关积分算法的接地腐蚀监测装置，实现了极化电阻和土壤电阻率的同时测量，具有较高的抗电磁干扰和交流干扰能力，其测量结果较传统方法离散性小。

(3) 在山西省安装的两套接地网无线腐蚀监测系统，实现了接地网腐蚀监测的远程自动化。经过半年多的运行，监测系统的实时测量数据与现场开挖结果具有一致性，表明腐蚀监测结果可信度高。

参考文献

[1] 刘健, 王树奇, 李志忠等. 接地网腐蚀故障诊断的可测性研究 [J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 64

[2] 寄玉玉, 王佩, 张秀丽等. 接地网腐蚀状态原位检测技术研究 [J]. 华北电力技术, 2012, 11(8): 34

[3] 刘渝根, 滕永禧, 陈先禄等. 接地网腐蚀的诊断方法研究 [J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 19

[4] 刘洋, 崔翔, 赵志斌等. 基于电磁感应原理的变电站接地网腐蚀诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 97

[5] 王硕, 刘渝根, 游建川等. 大型接地网腐蚀优化诊断 [J]. 重庆大学学报: (自然科学版), 2006, 29(8): 33

[6] Martínez I, Castillo A, Andrade C. Non-destructive electrochemical techniques applied to the corrosion evaluation of the liner structures in nuclear power plants [J]. J. Nucl. Mater., 2008, 373(1): 226

[7] Subramaniam K V, Bi M. Investigation of the local response of the steel-concrete interface for corrosion measurement [J]. Corros. Sci., 2009, 51(9): 1976

[8] Poursaee A, Hansson C M. Galvanostatic pulse technique with the current confinement guard ring: The laboratory and finite element analysis [J]. Corros. Sci., 2008, 50(10): 2739

[9] 张咸进, 贺诚, 刘世海等.基于fpga高速数据采集的电化学阻抗分析仪的研制 [J]. 计算机与应用化学, 2008, 25(5): 579

[10] Feliu S, Gonzalez J A, Andrade C. Effect of current distribution on corrosion rate measurements in reinforced concrete [J]. Corrosion, 1995, 51(1): 79

[11] Feliu S, Gonzalez J A, Escudero M L, et al. Possibilities of the guard ring for electrical signal confinement in the polarization measurements of reinforcements [J]. Corrosion, 1990, 46(12): 1015

[12] Law D W, Millard S G, Bungey J H. Effect of electrode orientation on linear polarization measurements using sensor controlled guard ring [J]. Br. Corros. J., 2000, 35(2): 136

[13] Feliu S, Gonzalez J A, Miranda J M, et al. Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures [J]. Corros. Sci., 2005, 47: 217

[14] 丁元力, 董泽华, 周华林等. 基于护环技术的混凝土中钢筋腐蚀监测研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(5): 257

[15] 刘渝. 快速高精度正弦波频率估计综合算法 [J]. 电子学报, 1999, 27(6): 126

[16] Barbalat M, Lanarde L, Caron D, et al. Electrochemical study of the corrosion rate of carbon steel in soil: Evolution with time and determination of residual corrosion rates under cathodic protection [J]. Corros. Sci., 2012, 55: 246

[17] Feliu S, Gonzalez J A, Andrade C. Multiple-electrode method for estimating the polarization resistance in large structures [J]. J. Appl. Electrochem., 1996, 26(3): 305

[18] Wojtas H. Determination of corrosion rate of reinforcement with a modulated guard ring electrode; analysis of errors due to lateral current distribution [J]. Corros. Sci., 2004, 46(7): 1621

[19] 董泽华, 罗颖, 易宜君. 钢筋混凝土在线腐蚀监测中护环电极智能约束研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 247

